

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**TESTOVÁNÍ PŘENOSOVÝCH VLASTNOSTÍ
VÍCEJÁDROVÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN**

TESTING THE TRANSMISSION PARAMETERS OF MULTI-CORE OPTICAL FIBERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Chrenčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Látal, DiS.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Dominik Chrenčík

ID: 211256

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Testování přenosových vlastností vícejádrových optických vláken

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je rozbor problematiky přenosu optického signálu pomocí vícejádrových (multicore) vláken. V rámci práce budou testovány přenosové parametry vícejádrových vláken, důraz bude kladen především na přeslechy mezi jednotlivými jádry vlákna. V rámci praktické části bude navrženo testovací zapojení, vytvořen model tohoto zapojení v simulačním programu VPIphotonics a následně bude proveden ověření výsledků simulací měření. Práce bude obsahovat vyhodnocení výsledků měření a srovnání s teoretickými předpoklady.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, Miloslav. 2017. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol. ISBN 978-808-6785-141
- [2] ORTIZ, Andrés Macho. 2018. Multi-Core Optical Fibers: Theory, Applications and Opportunities: Theory, Applications and Opportunities. Rijeka: IntechOpen, Ch. 4. ISBN 978-953-51-3814-3

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 31.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Michal Látal, DiS.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou vícejádrových optických vláken a měřením jejich přenosových vlastností. První část se krátce věnuje obecně optickým vláknům, dále podrobně rozebírá vícejádrové optické vlákna, jejich přenosové vlastnosti, techniku přenosu, metody spojování a metody výroby, druhy vícejádrových optických vláken, využití a provedené měření na konkrétních vláknech. Dále se zabývá návrhem měřicího modelu v simulačním nástroji VPIphotonics a simulací měření optických vláken. V poslední části se věnuje praktickému měření vícejádrového optického vlákna pomocí metody vložných ztrát, metody OTDR a vyhodnocením výsledků měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vícejádrová optická vlákna, přenosové vlastnosti, měření útlumu, metoda vložných ztrát, metoda OTDR, simulace.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the problematics of multicore optical fibers and the measuring of their transmission properties. The first part briefly deals with optical fibers in general, then discusses in detail multicore optical fibers, their transmission properties, transmission techniques, splicing and production methods, types of multicore optical fibers, use and measurements performed on specific fibers. The next part deals with the design of a measurement model in the simulation tool VPIphotonics and the simulation of optical fiber measurement. The last part deals with the practical measurement of multicore optical fiber using the method of insertion loss, OTDR method and evaluation of measurement results.

KEYWORDS

Multicore optic fiber, transmission properties, attenuation measurement, insertion loss method, OTDR method, simulation.

CHRENČÍK, Dominik. *Testování přenosových vlastností vícejádrových (multicore) optických vláken*. Brno, 2021, 46 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Michal Látal, DiS.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Testování přenosových vlastností více-jádrových (multicore) optických vláken“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Michalovi Látalovi, DiS. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	10
1 Optická vlákna	11
1.1 Druhy optických vláken	11
1.1.1 Jednovídná vlákna	11
1.1.2 Mnohovidová vlákna	11
1.2 Vícejádrová vlákna	12
1.2.1 Porovnání konstrukcí vláken	12
2 Přenosové vlastnosti optických vláken	14
2.1 Přeslechy	14
2.1.1 Obecný výpočet	14
2.2 Disperze	14
2.3 Technika přenosu	15
2.3.1 SDM – Space Division Multiplex	16
2.3.2 Konektory, ferule, broušení	16
2.3.3 Spojování vláken	18
2.3.4 Fan-In/Fan-Out zařízení	19
2.3.5 Optické lasery, zesilovače	20
3 Výroba vícejádrových vláken	21
3.1 Způsob skleněné preformy	21
3.1.1 Technika tyč v trubce	21
3.1.2 Technika vrtání	21
3.1.3 Srovnání technik	22
3.2 Vlákna fotonického krystalu	22
3.2.1 Vlákna s dutým jádrem	23
3.2.2 Vlákna s pevným jádrem	23
3.3 Stučková MCF	23
4 Využití optických vláken	25
4.1 Telekomunikace	25
4.2 Medicína	25
4.3 Experimentální fyzika	25
4.4 Optické senzorické systémy	26
4.4.1 Senzory s Braggovou mřížkou	26
4.4.2 Využití	26
4.4.3 Vícejádrové optické senzory	27

5	Měření vícejádrových optických vláken	28
5.1	Vlákno s 19 jádry a nízkými přeslechy	28
5.2	Vlákno se 7 spojenými jádry	29
5.3	Měření přeslechů	29
6	Simulace ve VPIphotonics	31
6.1	Zapojení pro simulaci	31
6.2	Výsledky simulačního měření	32
7	Praktická část	34
7.1	Přímá metoda - metoda vložného útlumu	34
7.1.1	Postup měření	34
7.1.2	Výsledky měření	36
7.2	OTDR – Optical Time Domain Reflectometry	37
7.2.1	Princip metody OTDR	37
7.2.2	Postup měření	38
7.2.3	Výsledky měření	38
	Závěr	41
	Literatura	42
A	Kompletní tabulky naměřených hodnot	45
A.1	Přímá metoda	45

Seznam obrázků

1.1	Konstrukce vícejádrových vláken	13
2.1	Mechanismus spojování čoček	19
3.1	Průřez vláknem – technika tyč v trubce	22
3.2	Ribbon flat vlákno	24
5.1	Rozmístění 19 jader	28
5.2	Schéma zapojení měření přeslechů	30
6.1	Schéma zapojení	31
6.2	Optický zdroj	31
6.3	Měřič výkonu	32
6.4	Útlum jader	33
6.5	Optické spektrum signálu	33
6.6	Eye diagram	33
7.1	Zapojení pro kalibraci	35
7.2	Přímá metoda	35
7.3	OTDR zapojení	38
7.4	OTDR port 19	39
7.5	OTDR port 5	39

Seznam tabulek

5.1	Vlastnosti 19jádrového vlákna	29
6.1	Simulační měření – útlum	33
7.1	Útlum [dB] při 1310 nm	36
7.2	Útlum [dB] při 1550 nm	37
7.3	Průměrný útlum při buzení jednoho jádra	37
7.4	OTDR při 1310 nm	40
7.5	OTDR při 1550 nm	40
A.1	Útlum [dB] při 1310 nm, FPM-602	45
A.2	Útlum [dB] při 1550 nm, FPM-602	45
A.3	Útlum [dB] při 1550 nm, Datasheet	45
A.4	Útlum [dB] při 1550 nm, PM-420	46
A.5	Útlum [dB] při 1550 nm, PM-800	46
A.6	Útlum [dB] při 1550 nm, Datasheet	46

Úvod

Optoelektronika je v současnosti důležitou částí telekomunikací. Klasická metalická vedení pomalu dosahují svých přenosových limitů a bylo třeba najít nový způsob přenosu, který by vyhovoval současným, ale i budoucím požadavkům na přenosovou rychlost a kapacitu linek. Optická vlákna mají oproti metalickým vedení nesporné výhody právě v přenosové rychlosti a kapacitě, dosahují menších ztrát a je také obtížné je odposlouchávat, navíc jsou odolná vůči elektromagnetickému rušení.

Optické přenosové systémy dosáhly přenosové kapacity 100 Tb/s na jedno vlákno s různými technikami multiplexu a předpokládá se, že sahají ke svému maximu. Pro další zvýšení je potřeba zvětšit přenosovou šířku pásma a spektrální účinnost. Jako možné řešení se ukázalo využití multiplexu s prostorovým dělením SDM (Space Division Multiplex) v kombinaci s vícejádrovými optickými vlákny. Do jednoho optického vlákna se místo jednoho jádra vloží těchto jader hned několik, čímž se mnohonásobně zvětší přenosová kapacita. Toto řešení však s sebou přineslo problém v podobě přeslechů mezi jednotlivými jádry, který se podařilo částečně potlačit použitím heterogenních jader místo homogenních. Vícejádrová vlákna jsou však neustále vyvíjena a jsou dosahovány nové hranice přenosových kapacit.

Cílem této bakalářské práce je rozebrat problematiku vícejádrových optických vláken, zaměřit se na jejich přenosové vlastnosti a tyto vlastnosti reálně změřit v laboratoři. V první části je uveden popis optických vláken a jejich rozdělení. Dále se práce již věnuje samotným vícejádrovým vláknům. Popisuje jejich druhy, přenosové vlastnosti, techniku přenosu, využití, metody a možnosti spojování a výroby.

V další části se zabývá návrhem a vytvořením simulačního modelu v simulačním nástroji VPIphotonics, popisem využitých komponent a simulací měření 7jádrového optického vlákna.

Poslední část je zaměřena na praktické měření vícejádrového vlákna s využitím metody vložných ztrát a reflektometrické metody OTDR. Je zde uveden popis těchto metod a kroky, podle kterých se postupovalo. Měření se zabývá přeslechy mezi jednotlivými jádry, ztrátami, měrným útlumem, délkou trasy a kontinuitou vlákna. Naměřené hodnoty jsou dále vyhodnoceny a porovnány s hodnotami od výrobce.

1 Optická vlákna

Historie moderních optických vláken sahá do 70. let minulého století, kdy se útlum vláken pohyboval kolem 20 dB/km. O pár let vývoje později už vlákna dosahovala útlumu 4 dB/km. V 90. letech již probíhaly přenosy na desítky kilometrů s útlumem pouhých 0,5 dB/km. Další pokrok technologií umožnil, že dnešní optická vlákna mají útlum 0,2 dB/km.

Optická vlákna se vyrábějí z čistého křemičitého skla, ale existují také vlákna plastová. Přenos informace optickým vláknem umožňuje světelný paprsek. Přenosová trasa zahrnuje modulovaný zdroj záření, optické prostředí a přijímač optického záření. Nositelem signálu jsou fotony. U optických vláken nedochází k elektromagnetickému rušení a těžko se odposlouchávají, což je jejich velká výhoda proti metalickým vedením [1].

1.1 Druhy optických vláken

Optická vlákna se dělí podle počtu jader uvnitř pláště na:

- Jednojádrová
- Vícejádrová

Jádrem optického vlákna se může šířit jeden nebo více vidů (režimů). Vid představuje jeden paprsek světla nesoucí informaci. Tyto vidy se mohou pohybovat vláknem odlišně, může jich být různý počet, a tak se optická vlákna dále dělí na jednovidová, mnohovidová a gradientní.

1.1.1 Jednovidová vlákna

Vyznačují se malým průměrem jádra blízkým jen několika vlnovým délkám světla (7–9 μm), v tak malém jádru se paprsek odráží pod velkým úhlem, což prodlužuje délku dráhy paprsku. Vláknem se šíří pouze jeden vid, tato vlákna mají velmi malý útlum (0,2–0,4 dB/km), velmi malou disperzi (0,3 ns/km), velkou přenosovou šířku pásma (až 10 GHz) a používají se pro přenosy na velké vzdálenosti [1].

1.1.2 Mnohovidová vlákna

Vlákna mají větší průměr jádra (50–200 μm), můžou se jimi šířit stovky až tisíce vidů dle průměru jádra a použité vlnové délky. Tato vlákna se používají na kratší vzdálenosti z důvodu většího útlumu (5–20 dB/km), především v automatizaci a lokálních sítích. Šířka pásma je zde 60 MHz a disperze 50 ns/km [1].

Gradientní vlákna

Oproti vláknům mnohavidovým mají menší disperzi, menší útlum (2,5–5 dB/km), větší šířku pásma (600 MHz) a jejich výroba je složitější. Využití je převážně na kratší vzdálenosti. Index lomu se zvyšuje se vzdáleností od středu vlákna. [1].

1.2 Vícejádrová vlákna

Během posledních let až desetiletí výrazně vzrostl datový provoz v přístupových a páteřních sítích. Vliv na to měl vývoj různých streamovacích přenosů a cloud computingu. Kapacita současného provozu je pokryta systémy vlnového multiplexu (WDM – Wavelength Division Multiplex), využívajícími jednovidová jednojádrová vlákna, avšak tyto systémy se blíží svým limitům.

Vícejádrová vlákna (MCF – Multi-Core Fiber) mohou významně zvýšit přenosovou kapacitu optických sítí. Poskytují nové možnosti testování fyzických jevů a vývoje v různých oblastech, např. zobrazovací lékařské metody.

Nejpoužívanější konstrukce vícejádrových vláken můžeme vidět na obr. 1.1 [2].

1.2.1 Porovnání konstrukcí vláken

U homogenních vláken mají všechna jádra stejný index lomu, naproti tomu u heterogenního vlákna je alespoň jedno jádro, které má rozdílný index lomu.

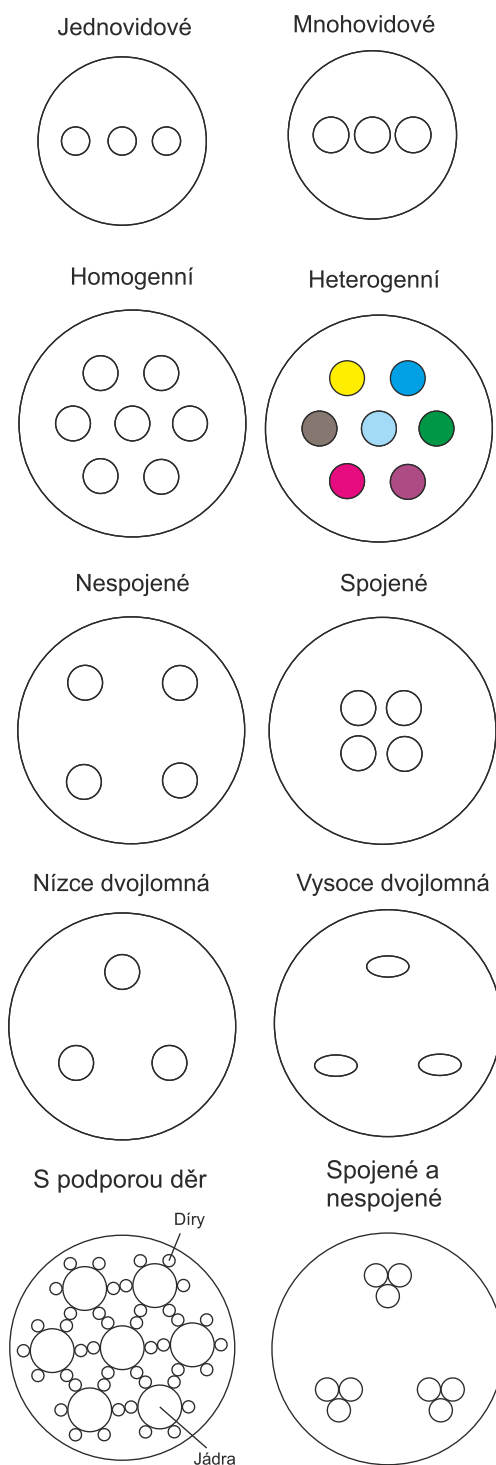
U spojených/nespojených jader vícejádrových vláken je zásadní vzdálenost mezi jednotlivými jádry, která určuje míru přeslechu mezi jádry. U nespojených, nebo-li slabě vázaných vláken, jsou cílem co nejnižší přeslechy. Pokud je spojených, nebo-li silně vázaných vláken, vzdálenost homogenních jader menší než sedminásobek poloměru jádra, jsou vidy jader zdegenerovány a vlákno podporuje supermody. To se nazývá vlákno se spojenými jádry (CCMCF – Coupled-Core MCF).

Pokud je vzdálenost jader větší než v předchozím případě, tak nedochází ke generování supermodů a každé jádro poskytuje samostatnou přenosovou cestu a je označeno jako vlákno s nespojenými jádry (UC-MCF – Uncoupled-Core) [2].

„Pokud je vnitřní lineární dvojlom každého jádra $\Delta n = |n_x - n_y|$ menší než 10^{-7} , MCF se označuje jako nízko dvojlomné MCF (LB-MCF – Lowly Birefringent MCF). Nicméně, pokud dané jádro má $\Delta n > 10^{-7}$, vlákno je známé jako vysoce dvojlomné MCF (HB-MCF – Highly Birefringent MCF)“ [2]. (vlastní překlad) ¹

¹Původní znění: „If the intrinsic linear birefringence of each core $\Delta n = |n_x - n_y|$ is lower than 10^{-7} , the MCF is referred to as lowly birefringent MCF (LB-MCF). Nonetheless, if a given core has a $\Delta n > 10^{-7}$ the MCF is known as a highly birefringent MCF (HB-MCF).“

Mezi další konstrukce vláken můžeme zahrnout vlákna s posunutou disperzní charakteristikou, vlákna s podporou děr, spojená a zároveň nespojená vlákna nebo vlákna tvaru šestiúhelníku [2].



Obr. 1.1: Konstrukce vícejádrových vláken

2 Přenosové vlastnosti optických vláken

Přenosové vlastnosti optických vláken se liší v závislosti na typu vlákna. Mnohovidová vlákna s proměnným indexem lomu mají v porovnání s mnohovidovými vlákny s konstantním indexem lomu jádra menší útlum, disperzi, větší šířku pásma, ale jsou složitější na výrobu. Rozměry těchto vláken jsou dle standardu ITU-T: průměr jádra $50\text{ }\mu\text{m}$, průměr pláště $125\text{ }\mu\text{m}$. Jednovidová vlákna mají oproti mnohovidovým ještě menší útlum i disperzi a větší šířku pásma. Rozměry jsou: průměr jádra $7\text{--}9\text{ }\mu\text{m}$ a průměr pláště $125\text{ }\mu\text{m}$. Přenosové vlastnosti zahrnují např. průměr jádra, ztráty, měrný útlum, disperzi, šířku pásma, přeslechy a minimální poloměr ohybu.

2.1 Přeslechy

Přeslechy mezi jednotlivými jádry vlákna vznikají kvůli podélným nebo časovým deterministickým náhodným poruchám. Mezi podélné poruchy patří ohýbání, kroucení a výrobní nedokonalosti vlákna. Časové poruchy jsou závislé na vnějších vlivech prostředí jako kolísání teploty, vibrace, poloměr ohybu nebo rychlost zkroucení vlákna [2].

2.1.1 Obecný výpočet

Statistický průměr přeslechu XT_μ nebo střední přeslech XT vyjadřuje rovnice

$$\frac{\partial P_n}{\partial z} = h(P_m - P_n),$$
$$\frac{\partial P_n}{\partial z} = h(P_m - P_n),$$
(2.1)

kde h značí koeficient vazby výkonu mezi jádry m a n , P značí průměrný výkon jádra. V případě nízkých přeslechů, kdy můžeme výkon jádra aproximovat jako konstantu, lze XT_μ vyjádřit jako hL , kde L je délka vlákna [3].

2.2 Disperze

Disperze je změna tvaru a šířky impulsu, který se šíří skrz vlákno a způsobuje zkreslení přijímaného signálu, omezuje tedy šířku pásma. Můžeme ji rozdělit na:

- Vidová disperze nebo taky modální disperze, která zahrnuje:
 - polarizační vidovou disperzi (PMD – polarization-mode dispersion).

- Chromatická disperze, nebo-li disperze skupinové rychlosti (GVD – group-velocity dispersion). Ta zahrnuje:
 - materiálovou disperzi,
 - vlnovodovou disperzi.
- Intermodální disperze nebo také disperze spojující módy (MCD – mode-coupling dispersion).

Vidová disperze roste s počtem vedených vidů a vzniká kvůli rozdílné konstantě šíření vedených vidů. Pouze u vícevidových vláken. Snížit ji lze použitím jádra s menším průměrem či obecně s použitím nižšího počtu vidů nebo použitím gradientního vlákna, aby jednotlivé vidy dorazili do cíle ve stejnou dobu.

Chromatická disperze – zdroje záření mají určité spektrum vlnových délek a jednotlivé složky spektra se šíří vláknem různou rychlostí. Každá vlnová délka má jiný index lomu a tedy dorazí na konec vlákna v různý okamžik. Např. u jednovidových vláken je chromatická disperze nulová u vlnové délky 1310 nm.

Materiálová disperze vzniká kvůli závislosti indexu lomu na vlnové délce. Jednotlivé složky spektra se šíří vláknem odlišnou fázovou rychlostí.

Vlnovodová disperze vzniká změnou geometrie vlny vedené vláknem, která změni podélnou skupinovou a fázovou rychlost.

Polarizační vidová disperze – u jednovidových vláken se vid šíří současně ve dvou na sebe vzájemně kolmých polarizačních rovinách. Různé nesymetrie vlákna způsobené výrobou, montáží nebo vnějšími vlivy způsobí, že se vid bude šířit v obou rovinách jinou rychlostí a dojde ke změně šířky pulsu a zkreslení signálu.

Intermodální disperze – čím menší je vzdálenost mezi jádry, tím větší vzniká intermodální disperze. Ta představuje rozdíl mezi skupinovým zpožděním. Pokud je šířka pulsu na konci vlákna stejná nebo menší než velikost intermodální disperze, pulz se rozšíří nebo se může rozpadnout [4] [5] [6].

2.3 Technika přenosu

Optický laser vysílá krátké světelné impulsy (paprsky světla), které vstupují do vlákna a způsob, jakým se vláknem pohybují, závisí na indexu lomu. Index lomu se může měnit skokově, tato vlákna se potom označují jako světlovody vrstvé a přenos je založen na totálním odrazu. V případě proměnného indexu lomu se paprsek pohybuje vláknem po dráze spirály ve tvaru elipsy nebo kruhu.

Totální odraz vychází ze Snellova zákona

$$\sin \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (2.2)$$

kdy index lomu jádra n_1 je větší než index lomu pláště n_2 a α_1 značí úhel dopadu a α_2 značí úhel lomu. V situaci, kdy je úhel lomu $\alpha_2 = 90^\circ$, tedy $\sin \alpha_2 = 1$, se tento

úhel nazývá mezní nebo kritický a při překročení tohoto úhlu dochází k totálnímu odrazu paprsku světla zpět do prostředí opticky hustšího.

Důležitou vlastností optických vláken je numerická aparatura NA vyjádřená rovnicí

$$NA = \sqrt{(n_{\text{jádro}}^2 - n_{\text{obal}}^2)} = \sin \Theta. \quad (2.3)$$

Ta udává maximální úhel vzhledem k ose vlákna, pod kterým může světlo do vlákna vstupovat a šířit se v něm [1] [7].

Problémem vícejádrových vláken je spojení světla pro více-signálové kanály v různých jádrech vlákna a následné zpracování výstupů z více jader.

Dalším problémem je spojování vícejádrových vláken, které je složitější než spojování klasických jednojádrových vláken [2].

2.3.1 SDM – Space Division Multiplex

Multiplex s prostorovým dělením je znám téměř od počátku optických vláken. První návrhy vícejádrových vláken přišly již v roce 1979.

Tato metoda využívá prostorový rozsah vlákna pro vytvoření paralelních datových kanálů. U vícejádrových vláken je do jednoho vlákna vloženo více jader s dostatečnými odstupy mezi jednotlivými jádry, aby se minimalizovali přeslechy. Pro přenosy na velké vzdálenosti se jedním jádrem šíří pouze jeden světelný paprsek nebo-li vid. Pro přenosy na kratší vzdálenosti lze přes jednotlivá jádra přenášet více vidů a ještě zvýšit přenosovou kapacitu.

V posledních několika letech došlo k rychlému pokroku v oblasti SDM, který zahrnuje vylepšení konvenčních vláken a velmi precizní výrobní metody, např. pro vlákna s dutými jádry. Dále byly vyvinuty vysoce výkonné vláknové lasery, koherentní detekční systémy s možností elektronického potlačení přeslechu na přijímači.

Pro výhodné použití techniky SDM je třeba kromě zvýšení kapacity zvýšit energetickou účinnost a také snížit náklady na přenos, tedy cenu za bit. Snižování nákladů je poměrně výzvou, jelikož např. u multiplexu vlnového dělení WDM (Wavelength Division Multiplexing) může jednu komponentu, např. zesilovač, modul kompenzace disperse, sdílet mnoho přenosových kanálů [8].

2.3.2 Konektory, ferule, broušení

Typy konektorů:

- ST – historický, ferule 2,5 mm, využívaný v LAN, pouze simplexní spojení, bajonetový uzávěr, v 90. letech u nás hojně využívaný především pro vícevidová vlákna pro technologie 10Base-FL a 100Base-Fx.

- FC – velmi podobný ST, ferule 2,5 mm, přichycení ke spojce pomocí závitu, v 90. letech u nás nejspíš nejpoužívanější konektor pro jednovidová vlákna.
- SC (Subscriber Connector) – asi nejpoužívanější konektor v LAN sítích pro jednovidová i vícevidová vlákna, odstranil složitou manipulaci s bajonetem, nahrazeno principem táhni/zasuň, původně pouze simplexní, později modifikace na duplexní spojení. Vytlačován konektorem LC.
- SC-RJ – konektor SC byl v duplexním spojení příliš velký a v patch panelu či zásuvce zabíral více místa než RJ45. SC-RJ je jakýmsi spojením dvou SC konektorů do jednoho, ale při stejném využití místa jako RJ45.
- LC (Lucent nebo Local Connector) – ferule 1,25 mm, duplexní, s příchodem Gigabit ethernetu se stal nejpoužívanějším konektorem, velmi využívaný např. v datacentrech či společnostech Cisco. Poloviční velikost oproti konektoru SC,
- MT-RJ – pouze duplexní, pouze pro vícevidová vlákna, velmi malý, kompozitní ferule, konektor má dva piny a protikus dvě zdířky.
- E-2000 – nejlepší konektor, ale taky nejdražší, před ferulí je krytka, která chrání před poškozením a vniknutím prachu, při zasunutí se otevře, při vysunutí zavře.

Ferule je malý váleček, na její přesnosti závisí parametry, dříve vyráběny z kovu, dnes hlavně keramické, kompozitní a levné plastové. Uprostřed ferule je prostor na vlákno, které je zde zafixováno lepidlem a zabroušeno.

Broušení / leštění Konec vlákna se zalomí a vloží do ferule, která se následně zabrousí. Leštění je navrženo tak, aby mezi spojovacími konci vláken při připojení konektoru nebyla žádná vzduchová mezera. Leštění zajišťuje fyzický kontakt vláken pro snížení zpětného odrazu signálu (odrazivost). Moderní zařízení nejčastěji používají leštění UPC, sítě kabelové televize hojně využívají leštění APC. Před připojením konektorů je vhodné spojovací plochy přechistit. Typy leštění:

- PC (Physical Contact) – ploché provedení konce konektoru, nevylučuje vznik vzduchových mezer, ruční leštění, odrazivost –35 dB.
- SPC (Super PC) – vyšší kvalita než PC, strojové leštění, odrazivost –45 dB.
- UPC (Ultra PC) – ještě vyšší kvalita, strojové leštění, odrazivost –50 až –55 dB.
- APC (Angled PC) – není kompatibilní s ostatními typy leštění a je označován zelenou barvou. Kontaktní plocha je zbroušena pod úhlem 8°, toto řešení snižuje odraz signálu na minimum, odrazivost –60 až –65 dB. Použití pouze u jednovidových vláken.

Konektory PC, SPC a UPC jsou vzájemně kompatibilní a jsou většinou označeny modrou barvou [9] [10].

2.3.3 Spojování vláken

Spojování vláken je důležitou součástí při výstavbě optické trasy. U optických konektorů se počítá s určitou deformací některých komponent v řádu několika mikrometrů a proto je nutné přesné vyrovnaní jader. Vyžadovaná přesnost je pod 1 μm .

Optický konektor potřebuje vyrovnávací mechanismus, který opakovaně dosahuje přesnosti menší 1 μm . Na běžný simplexní optický konektor nemají v místě připojení vnější působící síly vliv, protože ferule „plavou“ uvnitř pouzdra zástrčky. Tento plovoucí mechanismus brání deformacím ovlivňovat stabilitu připojení. U plovoucího mechanismu je mezi ferulí a pouzdem zástrčky mezera, která umožňuje pohyb ferule a její otáčení kolem své osy o $\pm 10^\circ$. Plovoucí mechanismus však způsobuje problém při vyrovnaní jader u MCF, kde je tolerance $\pm 0,5^\circ$ a při offsetu jádra u mnohovidových vláken dochází k nerovnoměrnému útlumu mezi jednotlivými vidy.

Požadavky jednovidových optických konektorů:

- útlum $< 0,5 \text{ dB}$,
- ztráta odrazem (return loss) $> 40 \text{ dB}$.

V případě tupého spoje (butt joint) je třeba, aby již zmiňovaná přesnost vyrovnaní byla pod 1 μm . Možnosti splnění těchto požadavků:

- (a) upevnění vlákna přesně na střed objímky,
- (b) přesným vyrovnaním objímky s dobrou opakovatelností měření,
- (c) potlačením Fresnelova odrazu ve spoji,
- (d) potlačením vlivu deformace pláště, způsobené okolními vlivy.

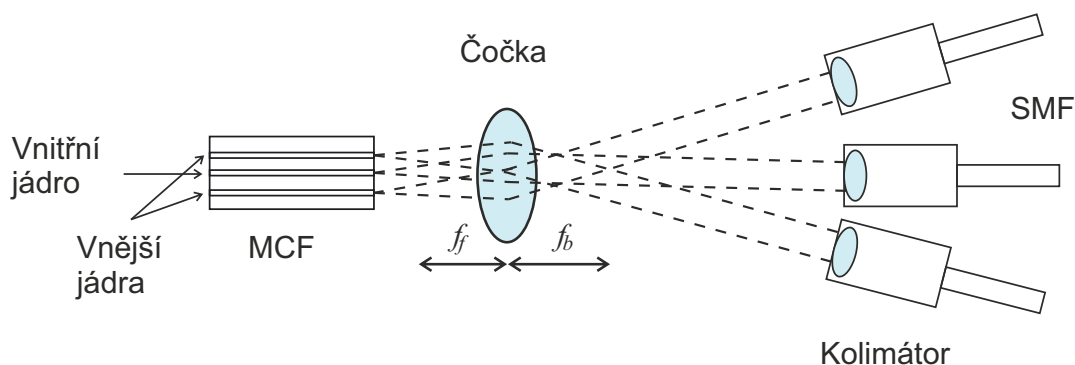
Pro spojování se používají objímky z oxidu zirkoničitého. S optickými kabely se většinou pracuje ručně a je třeba brát v potaz sílu i několika newtonů, která může působit na kabely. Taková síla působící na malé konektory může deformovat plášť kabelu i o více než 10 μm . Právě proto se používá plovoucí mechanismus, mechanismus spojování čoček (lens coupling) nebo spojování pomocí FIFO (Fan-In/Fan-Out) zařízení [11].

Tupý spoj

Doporučuje se, aby MCF konektory měly stejnou nebo větší hustotu obalu jako klasické konektory, např. konektory SFF (Small Form Factor). Dále by měly mít symetrickou strukturu. Pro stabilní připojení by na všechna jádra ve vláknech měl působit stejný tlak. Toho se docílí použitím např. konektoru SFF MU, LX-5, MPO nebo MTP. U spojování MCF lze také využít plovoucí mechanismus, ale je třeba použít Oldhamův vazební mechanismus (Oldham's coupling mechanism) pro splnění úhlové tolerance $\pm 0,5^\circ$ [11].

Mechanismus spojování čoček

Pro propojení SMF a MCF vláken se používá jediná čočka (lens) viz obr. 2.1. Konec MCF vlákna je u předního ohniska čočky f_f , optické paprsky z MCF se pohybují po optické ose a prochází zadním ohniskem čočky f_b pod určitým vstupním úhlem. Jednotlivé paprsky jsou po průchodu středem ohniska prostorově odděleny a pomocí optického kolimátoru spojeny s jednotlivými SMF vlákny [12].



Obr. 2.1: Mechanismus spojování čoček

2.3.4 Fan-In/Fan-Out zařízení

V optické trase s prostorově děleným multiplexem SDM je multiplexor a demultiplexor, který přistupuje s minimálními ztrátami a přeslechy k jednotlivým režimům mnohovídných vláken nebo jednotlivým jádrům MCF. U MCF se toto zařízení označuje FIFO a spojuje světelný signál ze samostatných jednovídných vláken do jednotlivých jader MCF.

Existuje několik konfigurací FIFO zařízení a mezi nejčastější patří:

- tavené kuželové zúžení (fused taper),
- 3D vlnovod (3D waveguide),
- optika volného prostoru (free space optic).

Princip taveného zúžení spočívá v umístění dvou vláken paralelně vedle sebe. Ve střední části je odstraněna povrchová úprava a tato část je zahřívána. Konce vláken jsou roztahovány, dokud se střední části vláken nespojí. Problémem je, jak navázat světelné paprsky do MCF s malou roztečí jader a zachovat nízké přeslechy.

V případě optiky volného prostoru má FIFO nízký vložný útlum a přeslechy. Potřebuje však drahou vlastní optiku a precizní zarovnání jader. Spadá sem již zmiňovaný mechanismus spojování čoček.

Dále vzniká problém s uspořádáním jader ve vlákne, optimální uspořádání pro většinu FIFO zařízení je hexagonální a např. pro čtvercové uspořádání u techniky zúžení je třeba využít speciální plošinu s mikro-otvory [13].

2.3.5 Optické lasery, zesilovače

Pro přenosy na dlouhé vzdálenosti se využívají optické zesilovače. Pro vícejádrová vlákna jsou používány zesilovače s vlákny dopovanými erbiem, kdy jsou zesilována všechna jádra současně.

Optické lasery, zesilovače a senzory používané pro MCF byly v posledních letech důkladně zkoumány, především multirežimová interference, která se používá v laserech, zesilovačích a senzorech pro zvýšení účinnosti konstrukcí založených na jednojádrových vláknech.

„Dnes, většina MCF laserů a zesilovačů pracuje ve fázi supermodu kombinující vysokým jas a profil blízké difrakce omezené vzdáleným polem“ [2].

(vlastní překlad) ¹

¹Původní znění: „To date, most CC-MCF lasers/amplifiers operate in the in-phase supermode combining high brightness and near-diffraction limited far field profile.“

3 Výroba vícejádrových vláken

Podle zvolené konstrukce vícejádrového vlákna viz kap. 1.2.1 se odvíjí způsoby výroby a také výsledné přenosové vlastnosti.

Cílem při výrobě vícejádrových vláken je minimalizovat přeslechy pomocí maximální izolace jádra. Kromě spojených MCF, které produkují supermody na základě přeslechů.

Výroba vícejádrových vláken je složitý proces, především u některých speciálních konstrukcí je obtížné je dostat do výsledné podoby, takže mohou vznikat nelinearity a vyšší úrovně přeslechů.

Většinou se při návrhu a ověření konstrukce vícejádrových vláken využívá simulačních nástrojů, především pro určení ztrát výkonu a přeslechů mezi jádry [2].

Vícejádrová vlákna jsou vyráběna stejnou, jen mírně upravenou technologií jako jednojádrová vlákna nebo jako vlákna fotonického krystalu, kde není žádných úprav třeba.

První způsob je založen na tažení ze skleněné preformy (plynná fáze), kdy vrstvy na povrchu jsou dopovány kysličníky. Způsob tažení se označuje stack-and-draw [14].

3.1 Způsob skleněné preformy

Narozdíl od výroby jednojádrových vláken je u MCF více jader a je tedy třeba využít např. techniku zvanou tyč v trubce nebo techniku vrtání.

Výsledné vlastnosti vlákna jsou dány vlastnostmi preformy. Její příprava je proto nejdůležitějším krokem ve výrobě [1] [2].

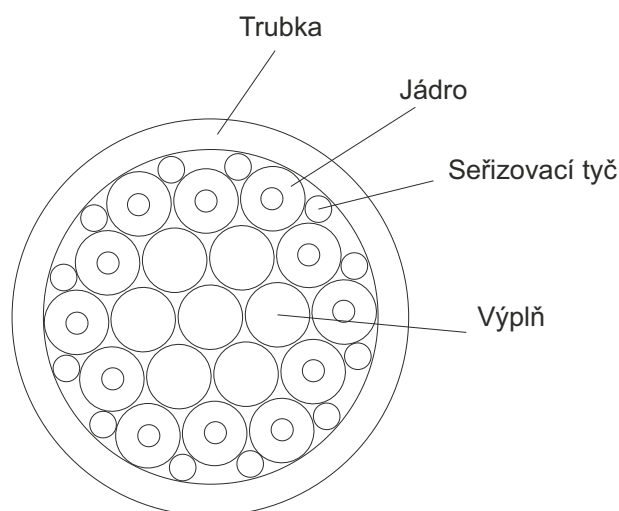
3.1.1 Technika tyč v trubce

Jádra spolu s nastavovacími seřizovacími tyčkami, které udržují rozestupy mezi jádry a jejich rozmístění, se ukládají do trubky viz obr. 3.1, čímž vzniká předlisek, nebo-li preforma, skleněný polotovar tvaru válce.

Intenzivně zahřátá preforma umožňuje tažení vlákna, na které se bezprostředně po tažení navléká polymerová vrstva tlustá několik desítek mikrometrů (primární ochrana) [15].

3.1.2 Technika vrtání

Do skleněného předlisku (preformy) se pomocí vhodného nástroje vyvrtají díry. Díry se vyčistí a následně se do nich vkládají jádra. Poté se z preformy stejným způsobem jako u předchozí techniky táhne vlákno a namotává se na klubko [15].



Obr. 3.1: Průřez vláknem – technika tyč v trubce

3.1.3 Srovnání technik

Přesnost zarovnání jader je u techniky vrtání vyšší, jelikož u techniky tyč v trubce je při skládání jader a tyček vůle. U vrtání je třeba, aby se vyvrtané otvory řádně zbrousili a vyčistili, jinak by mohl vznikat nadměrný útlum. U této techniky je však omezení plynoucí z délky vrtačky. Jakmile se vyřeší problémy se zarovnáním jader u techniky tyč v trubce, stane se hlavní metodou pro hromadnou výrobu vláken [15].

3.2 Vlákná fotonického krystalu

Tato vlákna se označují také děrovaná vlákna (Holey fibers). Dělí se na vlákna s pevným jádrem a vlákna s dutým jádrem, která mají menší index lomu než plášť.

Děrovaná vlákna jsou vyráběna upravenou technologií tažení. Vlákná jsou stohována a spojena zatavením, poté jsou tažena do kompozitních tyčí „multi-vlákna“ (multifiber). Multifibers jsou také stohována a spojována, takže se vytvoří pevný blok vláken s vytlačenými mezerami [16].

3.2.1 Vlákná s dutým jádrem

Fotonické bandgapové materiály udržují světlo uvnitř dutého jádra.

„Se správnou strukturou se odrazy od vrstev obklopujících jádro spojují a vytvářejí konstruktivní interferenci, když je světlo směřováno dovnitř a koncentrují světlo v dutém jádru. Naproti tomu světlo unikající ven je utlumené“ [16]. (vlastní překlad) ¹

Přestože duté jádro přenáší pouze jeden vid, je jeho průměr mnohem větší než u klasického jednojádrového jádra. Vlákná s dutým jádrem mají menší rozptyl světla a mohou mít nižší útlum než při vedení světla sklem. [16]

3.2.2 Vlákná s pevným jádrem

Tato vlákna jsou dvojího typu:

- se skutečným fotonickým vedením bandgap,
- založená na totálním odrazu.

Rozdíl je v efektivním indexu lomu. Větší počet děr v plášti znamená menší efektivní index lomu. Plášť má tedy nižší index než jádro a přenos probíhá na způsob totálního odrazu.

3.3 Stužková MCF

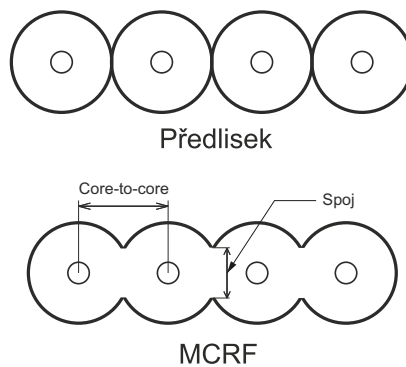
Stužková nebo-li plochá MCF (MCRF – Multi-Core Ribbon Fiber) byla vyvinuta za účelem potlačení přeslechů mezi sousedními jádry. Jádra jsou uspořádána v jedné lince. Bylo vyrobeno několik MCRF s využitím jako laserový zesilovač s vysokým výstupním výkonem. MCRF se vyrábějí všemi již dříve představenými způsoby. Tyto způsoby, ale vyžadují speciální skleněné trubice nebo složitý výrobní proces.

Výroba začíná přípravou předlisku se čtyřmi klasickými jednojádrovými jednojádrovými vlákny položenými vedle sebe viz obr. 3.2 [17] a spojenými pomocí křemičité tyčinky malé velikost zatavené hořákem s butan-kyslíkem.

Poté se předlisek žíhá v peci na 1700 °C pro odstranění vnitřního pnutí materiálu a ještě se předlisek 2-3x krátce zahřeje při teplotě 2100-2150 °C, aby se sousední vlákna povrchově spojila, stále však jdou lehce oddělit.

Následně se vlákno táhne z předlisku při teplotě 2100 °C rychlostí 0,5 m/min. Po procesu tažení se vlákna trvale spojí a mezi sousedními jádry vzniká fúze.

¹Původní znění: „With the proper structure, reflections from the layers surrounding the core combine to produce constructive interference when light is directed inward, concentrating light in the hollow core. In contrast, light leaking outward is attenuated.“



Obr. 3.2: Ribbon flat vlákno

Core-to-core vzdálenost je přibližně $118\text{ }\mu\text{m}$. Čím větší je tato vzdálenost, tím menší jsou přeslechy. Šířka spoje sousedních vláken je přibližně $45,45\text{ }\mu\text{m}$.

Vlákno může mít průměr ohybu $1,5\text{ cm}$ a snáší zatížení $11,38\text{ N}$, tahové napětí cca $194,75\text{ MPa}$ [17].

4 Využití optických vláken

4.1 Telekomunikace

Neustále rostoucí požadavky na zvýšení přenosové kapacity přenosových cest vedou ke snaze maximalizovat přenosovou kapacitu jednoho vlákna. Právě k tomuto účelu jsou zaváděny, vyvíjeny a zdokonalovány vícejádrová optická vlákna.

Další možností jsou mnohovidová vlákna a rovněž kombinace mnohovidová vícejádrová vlákna, která se označují jako MM-MCF (Multimode MCF). Tato vlákna mohou přenášet na velkém počtu kanálů, ale hodí se pouze pro přenosy na krátké vzdálenosti a jedinou možností zvyšování přenosové kapacity na dálkové přenosy je tedy zvyšování počtu jader při použití jednovidové technologie.

Kromě telekomunikací lze vlákna využít jako senzory. Je možné využít citlivosti spojení mezi více jádry na změny teplot, napětí apod. [2]

4.2 Medicína

V posledních letech byla studována možnost využití MCF senzorů v medicíně. Jedná především o zobrazovací metody při studiu biologických tkání. Multifotonová mikroskopie a adaptivní optika jsou na vzestupu díky vysoké citlivosti, rozlišení a rychlosti zobrazování.

Např. endoskop bez čoček využívá mikroskopii dvou fotonů buzených fluorescencí (TPEF – two-photon excited fluorescence) s využitím optického vlákna, které má získat vícefotonový obraz objektu. K výrobě ultratenkých endoskopů bez čoček slouží právě MCF [2].

Optické senzory se také používají při kardiovaskulární diagnostice, detekci tlaku v tepně, detekci tepen, intra-aortální balónková pumpa (IABP – intra-aortic balloon pumping), v urologii nebo implantáty na prostatu. MCF také mohou fungovat jako snímače zakřivení a 3D snímače [18].

4.3 Experimentální fyzika

Optická vlákna byla zkoumána pro využití jako platformy při testování fyzikálních jevů v kvantové mechanice, obecné teorii relativity či kondenzovaných látek. Např. Andersonův jev – nehybnost elektronu v neuspořádané mřížce, v dynamice tekutin při studiu lámajících se vln či dokonce v astronomii [2].

4.4 Optické senzorické systémy

Optovláknové senzory jsou zde již od konce 60. let. Jejich nástup byl velmi rychlý, ale stejně tak rychle opadl zájem o ně. Důvodem byla především finanční stránka, kdy stejnou službu poskytovaly výrazně levnější senzory mechanicko-elektrické. Dalším důvodem byl nedostatečný vývoj, výroba a možnosti optických technologií. Dnes lze pomocí optovláknových senzorů měřit většinu veličin a ve spoustě případů jsou nenahraditelné.

Optovláknové senzory lze rozdělit na:

- senzory extrinsické – využívající optické vlákno k přenosu informace,
- senzory intrinsické – optické vlákno slouží jako detektor a zjištěné hodnoty mohou být přenášeny i jinak než optikou,
- senzory smíšené – např. čidla polohy, biochemické senzory.

Dále mohou být senzory bodové, rozprostřené a polo-rozprostřené.

Optické senzory se používají především pro měření teploty a mechanického namáhání. Rozvíjející oblastí využití je detekce vibrací, deformací, lokalizace objektu a detekce nebezpečných chemických látek.

Díky jejich dielektricitě a elektricky izolačním materiálům je možné je využít v místech s výbušným prostředím a vysokým elektrickým napětím a odolávají elektromagnetickému rušení. Je možné je používat při velkém rozsahu teplot od mínus několika desítek po stovky °C. Nepodléhají korozi a nezatěžují přírodu, jelikož jsou vyrobeny z křemenného skla [1].

4.4.1 Senzory s Braggovou mřížkou

Spadají do senzorů bodových a jsou označovány jako FBG (Fiber Bragg Grating).

Braggovy mřížky jsou difrakční struktury v optických vláknech mající periodické nebo kvaziperiodické změny indexu lomu. S jejich pomocí se rozptýlí světlo závislé na rozložení změn indexu lomu, čímž vznikají difrakční minima a maxima při průchodu a odrazu světla. Dalšími difrakčními strukturami jsou mřížky s dlouhou periodou, nakloněné mřížky a podélné struktury ve vláknu.

Strukturu mřížky v jádrech vlákna lze vytvořit zářením UV laseru. Mezi minimem a maximem indexu lomu musí být velký rozdíl a mřížka by měla mít alespoň 1000 změn indexu lomu pro interakci se světelnou vlnou. Označení Braggova mřížka vyžaduje splnění Braggovy podmínky difrakce [1].

4.4.2 Využití

Sledování teploty vinutí transformátorů VVN (velmi vysoké napětí) – slouží k optimalizaci využití transformátorů s cílem prodloužit jejich životnost.

SHM (Structural Health Monitoring) – sledování vibrací, deformací a mechanických změn. Využití senzorů DTS (Distributed Temperature Sensing), DTSS (Distributed Temperature and Strain Sensing) a bodových senzorů s Braggovou mřížkou a senzorů SOFO (Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques). Kontrolují mosty, stožáry vysokého napětí a tunely. Stavby mohou být monitorovány i on-line. K monitorování budov lze využít speciální geotextilie s integrovanými senzory, které lépe odolávají vnějším vlivům (sníh, déšť, zemětřesení). Využívá se v oblastech s vyšší seismickou aktivitou a v chráněných částech měst. Geotextilie se umísťuje pod omítku a neruší tak vzhled budovy. Geotextilie lze také umístit do směsi betonu při stavbě.

Využití v železniční dopravě pro sledování počtu projíždějících vlaků, měření rychlosti vlaku, směru vlaku apod. Využívají se FBG senzory nalepené či navařené ke kolejnicím.

Sledování půdy BOTDA – Brillouin Optical Time Domain Analysis. Určeno ke sledování teploty a mechanických změn. Optické vlákno je použito jako snímač a monitorovat lze místo i několik kilometrů vzdálené.

Monitorování železobetonových konstrukcí pomocí senzorů SOFO [1].

4.4.3 Vícejádrové optické senzory

Většina optických senzorů využívajících vícejádrová vlákna využívá právě Braggovy mřížky z důvodu jejich technologické vyspělosti. Využívají se slabě vázaná MCF a tyto senzory nejčastěji monitorují různá zakřivení, ohyby a tvary objektů. Pomocí senzorů lze dosáhnout 3D snímku objektu pomocí jediného MCF. Toto řešení je však poměrně nákladné z důvodu drahých FIFO zařízení podporujících mřížky. Jednodušší variantou je spojení MCF s SMF, kdy MCF vlákna mají roli interferometru. Zde je však nevýhoda vysokých vložných ztrát a nemožnost kontrolovat výkon senzoru.

Dále je možnost využít silně vázaná MCF, kde vznikají supermody. Tyto MCF umožňují buzení a rekombinaci jednotlivých režimů. Oproti senzorům se silně vázanými MCF zde jsou minimální vložné ztráty a lze kontrolovat výkon senzoru. Využívají širokopásmový zdroj záření a spektrometr s nízkým rozlišením. Tyto senzory byly podrobeny testování ve vysoce přesné testovací laboratoři i v reálných podmínkách a jsou konkurencí pro již zavedené optické senzory [19].

5 Měření vícejádrových optických vláken

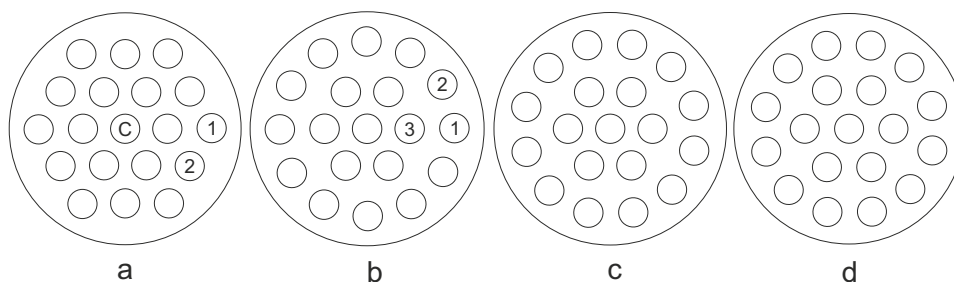
Tato část se zabývá popisem měření 19jádrového a 7jádrového vlákna, které bylo provedeno v Japonsku, resp. v USA. Dále se zabývá možnostmi měření přeslechů.

5.1 Vlákn s 19 jádry a nízkými přeslechy

Vědci Imamura, Gonda, Sugizaki ze společnosti Furukawa Electric co., Ltd., Ichihara, Chiba, Japonsko, vyrobili 19jádrové vlákno s přenosovou rychlostí 305 Tb/s, jehož problémem však byly přeslechy mezi jádry. Jádra byla uspořádána hexagonálně, plášť měl průměr 220 μm kvůli mechanické pevnosti. Vzdálenost od středu vnějších jader po hranu pláště byla 34,8 μm a core-to-core vzdálenost byla 37,6 μm .

Přeslech mezi jádry na vzdálenost 100 km při vlnové délce 1550 nm a poloměru ohybu 140 mm měl téměř lineární vztah ke vzdálenosti core-to-core. V tomto případě byl maximální přeslech 28,1 dB mezi středovým a vnitřním jádrem.

Zkoumalo se nejlepší uspořádání jader pro minimalizaci přeslechů viz obr. 5.1 [20].



Obr. 5.1: Rozmístění 19 jader

Vycházelo se z hexagonální mřížky obr. 5.1 (a), kde vzdálenost mezi středem jádra 1 a okrajem pláště je menší než vzdálenost středu jádra 2 a okrajem pláště. Vnější jádra se tedy uspořádala kruhově obr. 5.1 (b). Nyní jsou vnitřní jádra obklopena třemi jádry v těsné blízkosti a navíc jádro 1 je blíž k jádru 3 než jádro 2, proto se vnější jádra posunula o 15° viz obr. 5.1 (c), kde jsou vnitřní jádra obklopena dvěma vnějšími jádry ve stejné vzdálenosti a další dvě vnější jádra jsou již velmi vzdálená. Následně se ještě vnitřní jádra posunula směrem ven od středu vlákna, aby se snížil přeslech mezi středovým jádrem a vnitřním jádry obr. 5.1 (d). Vylepšením uspořádání se dosáhlo přeslechů kolem 40 dB u středového jádra a vnitřních jader a kolem 44 dB u vnějších jader [20].

Výsledné přenosové vlastnosti vlákna jsou v tab. 5.1 [20].

Tab. 5.1: Vlastnosti 19jádrového vlákna

Parametr \ Jádru	Středové	Vnitřní	Vnější
Měrný útlum [dB/km]	0,281	0,291	0,283
A_{eff} [μm^2]	84,9	85,3	84,9
λ_{cc} [nm]	1382	1382	1341
Chromatická disperze [ps/nm/km]	19,9	20	20
Sklon disperze [ps/nm ² /km]	0,064	0,065	0,065

5.2 Vlákno se 7 spojenými jádry

Vědci Ryf, Sakuma a spol. ze společnosti Sumitomo Electric Industries, Ltd., Yokohama, Kanagawa, Japonsko vyrobili 7jádrové coupled-core vlákno s hexagonálním uspořádáním a klasickým průměrem pláště 125 μm . Core-to-core vzdálenost byla $23,5 \pm 0,2 \mu\text{m}$. Útlum vlákna byl 0,171–0,172 dB/km, chromatická disperze 21,1–21,4 ps/nm/km a sklon chromatické disperze 0,06 ps/nm²/km při vlnové délce 1550 nm.

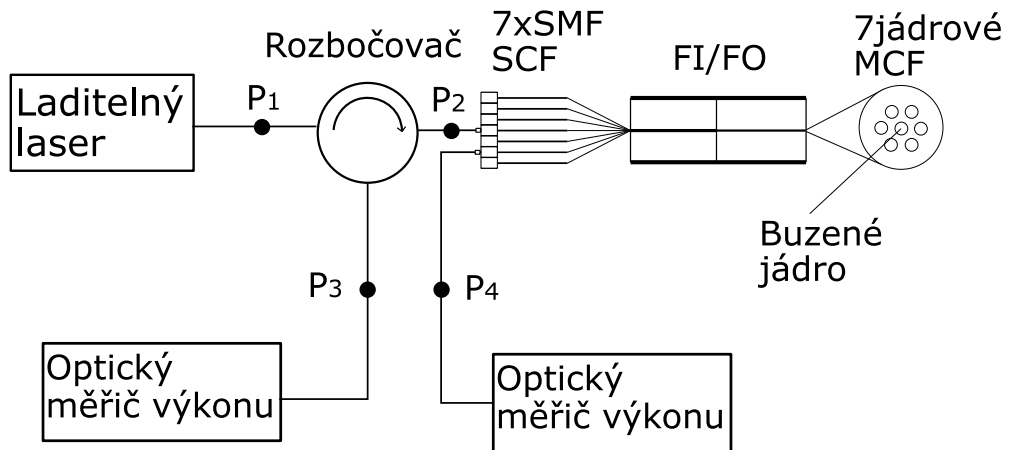
Spojení signálu do jader bylo řešeno pomocí FIFO zařízení. Předlisek vlákna byl vyroben technikou vrtání se sedmi mnohovidovými vlákny. Celkový počet kanálů byl 15. FIFO zařízení spojovalo vlákna jednovidová s vlákny mnohovidovými. Vložený útlum byl průměrně 1 dB na svazek jader, celková ztráta se zařízením FIFO při 110 km délce vlákna byla 21 dB [21].

5.3 Měření přeslechů

Přeslechy v MCF můžeme měřit na základě vazby mezi jádry jednovidového vlákna a MCF. Je k tomu potřeba precizní spojení všech jader mezi SMF-MCF a měření je také ovlivněno přesností spojky. Optický výkon všech jader je měřen na konci vlákna MCF pomocí již zmíněné vazby SMF-MCF. Poměr výkonu jader daný v dB vzhledem k buzenému jádru je označen jako přeslech.

Přeslechy u FIFO MCF lze měřit metodou založenou na Fresnelově odrazu na rozhraní MCF/vzduch. Není zde nutná vazba mezi SMF-MCF a metoda má srovnatelné výsledky jako klasická metoda. Schéma zapojení je na obr. 5.2 [22].

Body P_1 , P_2 , P_3 , P_4 na konci MCF označují místa měření výkonu. V bodě P_1 se měří výstupní výkon laseru, v bodě P_2 se měří výkon po vložení rozbočovače a používá se pro odhad přeslechu. Energie Fresnelova odrazu buzeného jádra se měří



Obr. 5.2: Schéma zapojení měření přeslechů

v bodě P_3 optickým měřičem skrz rozbočovač a energie Fresnelova odrazu sousedního jádra se měří v bodě P_4 přímo [22].

Velikost odražené energie buzeného jádra vyjadřuje rov. 5.1.

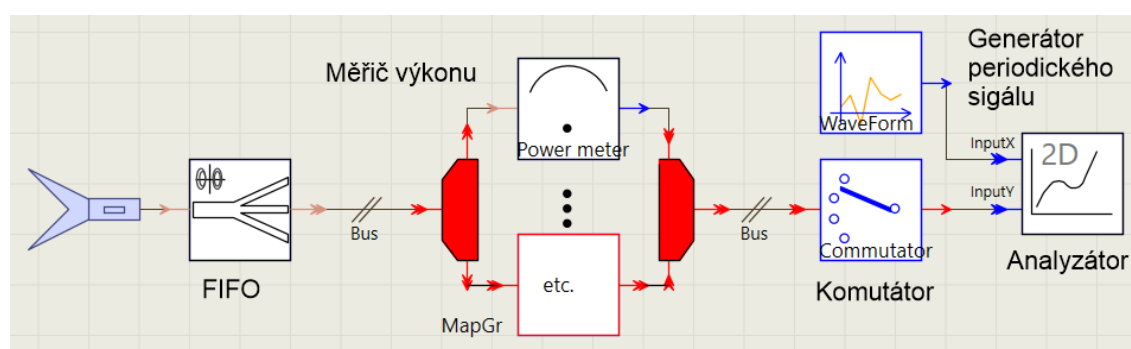
$$P_{3_dBm} = P_{2_dBm} - 2\alpha_C - 2\alpha_F - \alpha_R - \alpha_{23}, \quad (5.1)$$

kde

- α_C je ztráta na spoji P_2 ,
- α_F je vložná ztráta FIFO zařízení,
- α_R je ztráta Fresnelova odrazu,
- α_{23} je vložná ztráta rozbočovače mezi P_2 a P_3 [22].

Zdroj signálu představuje DFB laser s kontinuální vlnou CW (Continuous Wave), výkon laseru byl nastaven na 1 mW. Dále je zde Mach-Zehnderův interferometr jako modulátor, který v optice poskytuje požadovanou šířku pásma, minimalizuje dopady polarizace a využívá interference světla pro rozdělení jednoho paprsku na dva nebo více paprsků, generátor pseudonáhodných sekvencí, generátor vzorkovaného signálu NRZ (Non-Return-to-Zero) a Gaussův filtr, který omezuje pásmo modulovaného optického signálu pro potlačení šumu při převzorkování na vyšší vzorkovací frekvence.

V měřiči výkonu se MCF rozpojí zpět na jednotlivé režimy, postupně se změří výkon každého režimu a pomocí komutátoru a periodického signálu se zobrazí v bodovém grafu.



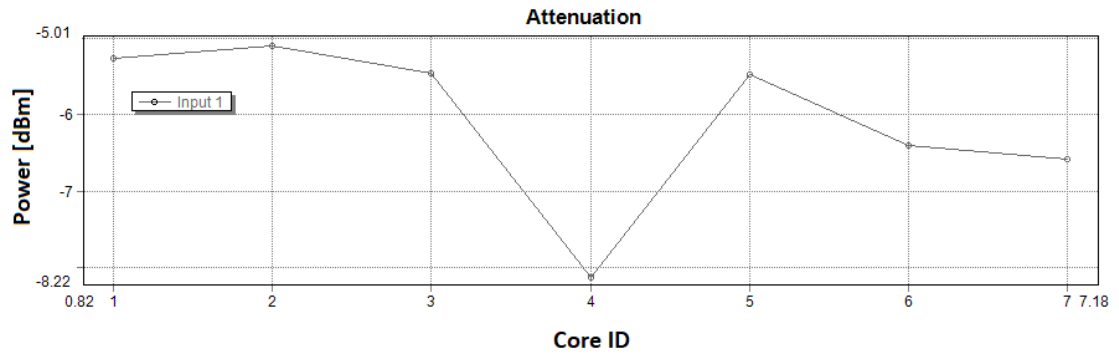
Obr. 6.3: Měřič výkonu

6.2 Výsledky simulačního měření

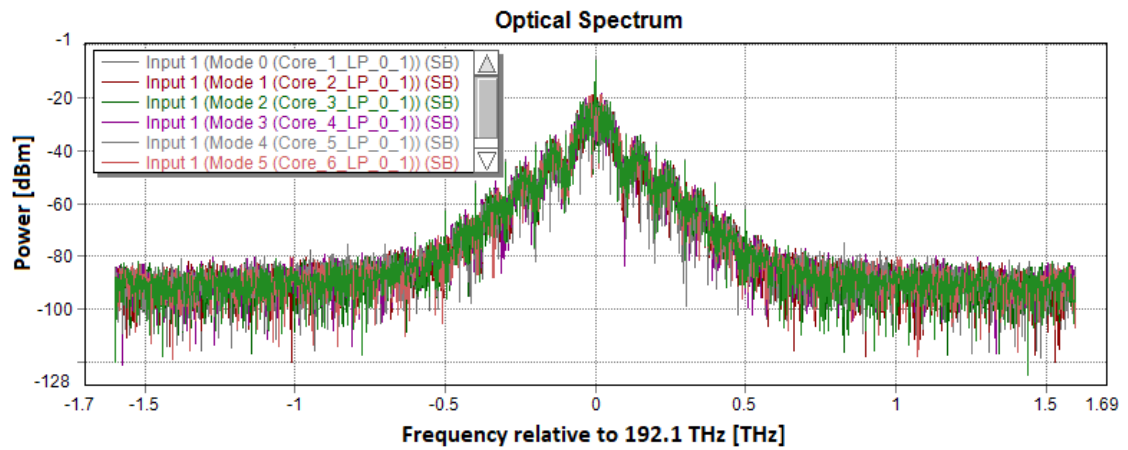
Bylo provedeno simulační měření 7jádrového vlákna s délkou 300 m a přenosovou kapacitou 700 Gb/s, měření proběhlo na vlnové délce 1550 nm. V grafech je zobrazeno optické spektrum signálu viz obr.6.5, diagram oka rozhodnutí (eye diagram) viz obr.6.6 a útlum na jednotlivých jádrech viz obr.6.4. V tab.6.1 jsou uvedeny přesné hodnoty útlumu. Útlum je vyjádřen v dBm, jelikož je vztažen k výkonu laseru 1 mW. Útlum jednotlivých jader byl naměřen nižší ve srovnání s hodnotami z datasheetu i hodnotami naměřenými reálně, jedná se však o simulační měření založené na předpokládaných hodnotách, které nezahrnuje různé reálné vlivy. Samotný průběh křivky útlumu však přibližně koresponduje s průběhem hodnot z datasheetu, kdy např. útlum prostředního jádra je znatelně nižší než u ostatních jader. Na diagramu oka můžeme vidět, že „oko“ je poměrně hezky otevřeno jak ve svislém, tak i vodorovném směru, to znamená, že se zde nachází málo šumu a přenos je tak kvalitní.

Tab. 6.1: Simulační měření – útlum

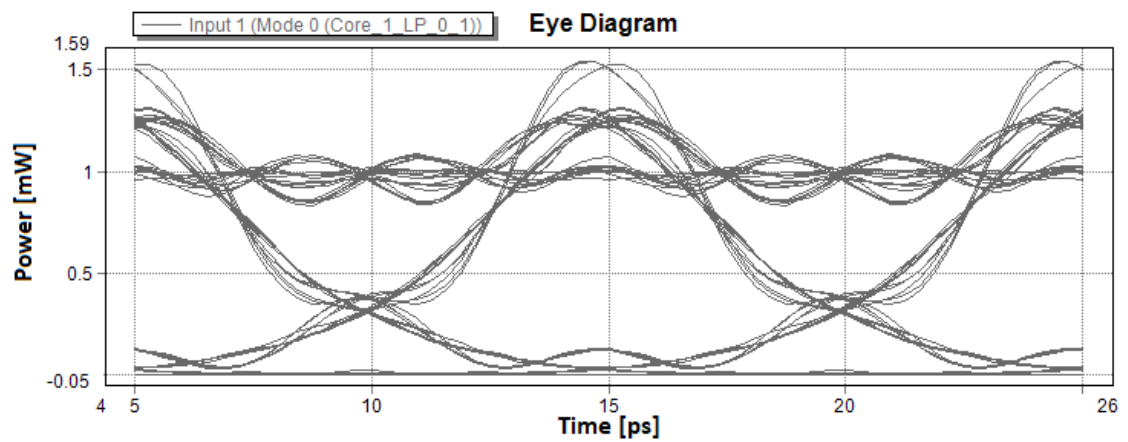
Jádno	1	2	3	4	5	6	7
Útlum [dBm]	5,26	5,10	5,45	8,13	5,48	6,40	6,58



Obr. 6.4: Útlum jader



Obr. 6.5: Optické spektrum signálu



Obr. 6.6: Eye diagram

7 Praktická část

V praktické části byly měřeny přenosové parametry 7jádrového vlákna. Mezi měřené přenosové parametry patřil útlum vlákna, ztráta, kontinuita vlákna a přeslechy mezi jednotlivými jádry vlákna. Měření probíhalo pomocí dvou měřících metod. První byla přímá metoda pro měření přeslechů a ztráty (útlumu), jako druhá byla využita metoda zpětné reflektometrie OTDR pro měření útlumu, ztráty, délky a kontinuity vlákna.

Vlákno společnosti InPhoTech mělo délku 300 m a jeho jednotlivá jádra byla pomocí FIFO zařízení vyvedena do portů optického rozvaděče viz obr. 7.2 [23].

Pro obě metody měření byl využit zdroj optického záření s kontinuální vlnou (CW – continuous wave). Tento zdroj dokáže vysílat optický signál ve třech vlnových délkách: 1310 nm, 1550 nm a 1490 nm nebo 1625 nm na jednom portu nebo ve čtyřech vlnových délkách 850/1300 nm a 1310/1550 nm na dvou portech.

7.1 Přímá metoda - metoda vložného útlumu

Metoda vložného útlumu je nedestruktivní metoda, což je velká výhoda oproti metodě dvou délek, která je destruktivní, avšak přesnější. Metoda vložného útlumu se používá u optických tras, kde jsou kabely již opatřeny konektory. Metoda probíhá ve dvou krocích. Nejprve se provede kalibrace měřicí soustavy pomocí referenčního vlákna, následně se referenční vlákno rozpojí a mezi něj se zapojí testované vlákno.

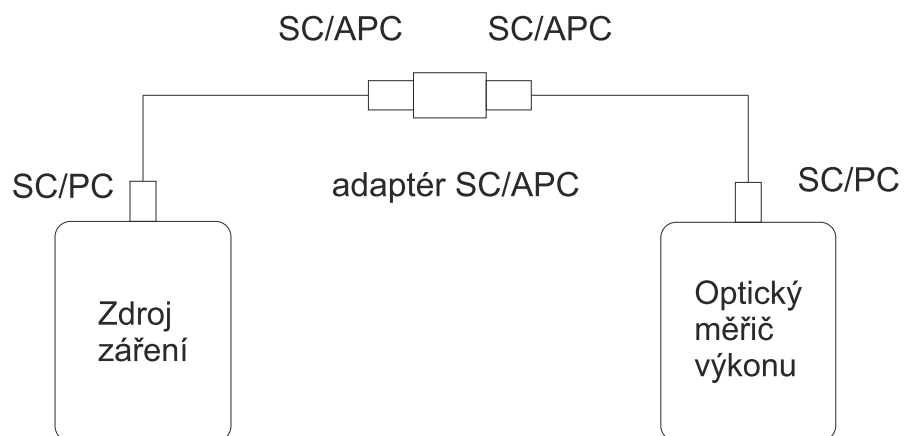
7.1.1 Postup měření

Pro kalibraci optické trasy byla do zdroje a měřiče výkonu zapojena referenční vlákna pomocí konektorů SC/PC, jejichž konce s konektory SC/APC se spojily pomocí adaptéru SC/APC viz obr. 7.1.

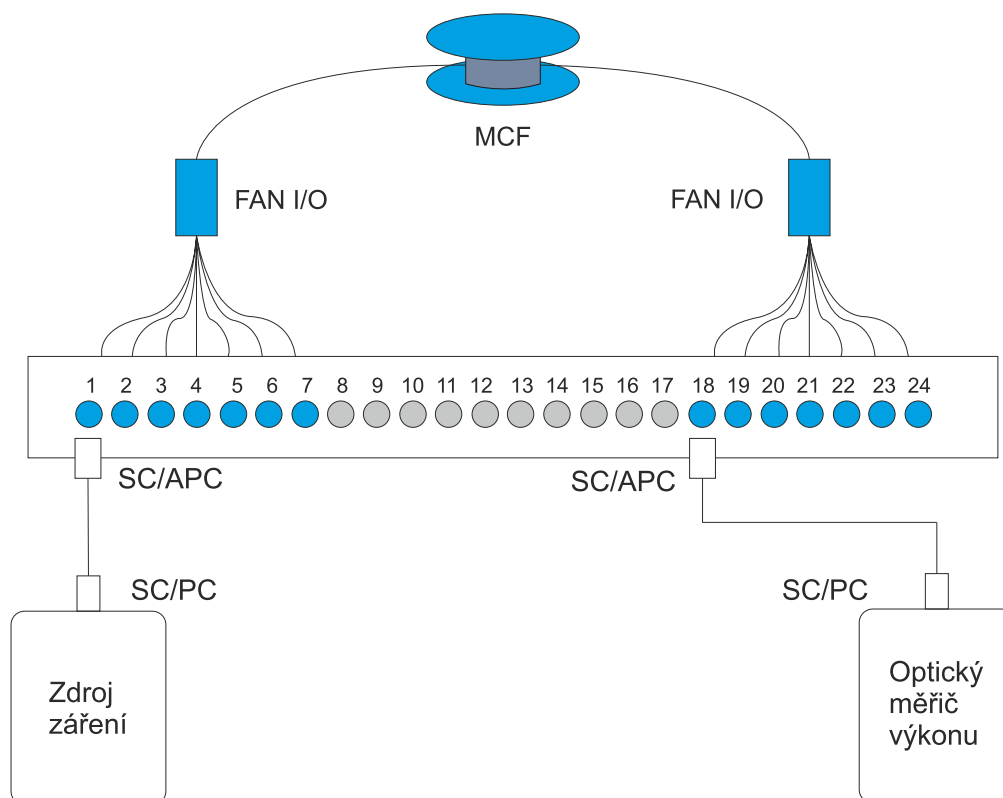
Kalibrace probíhá plně automaticky, kdy dojde k nastavení referenční hodnoty výkonu a nastavení výchozí hodnoty útlumu na nulu. Kalibrace byla provedena při každém přepojení konektoru na začátku trasy, tj. přepojení mezi porty č. 1–7.

Vlákno vedoucí ze zdroje bylo zapojeno do portu č. 1 a vlákno vedoucí z měřiče výkonu do portu č. 18 viz obr. 7.2. Do těchto portů je vyvedeno stejné jádro. Byla změřena hodnota útlumu pomocí měřiče výkonu, následně se přepojoval konektor z portu č. 18 do portů č. 19–24 a postupně se měřily přeslechy mezi buzeným jádrem č. 1 a ostatními jádry.

Trasu byla rozpojena, provedla se kalibrace a konektory se zapojily do portu č. 2 a 18 a opět se postupně změřily přeslechy.



Obr. 7.1: Zapojení pro kalibraci



Obr. 7.2: Přímá metoda

7.1.2 Výsledky měření

Měření proběhlo na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm. Naměřené hodnoty útlumu jednotlivých jader jsou v tabulkách 7.1 a 7.2, v případě vlnové délky 1550 nm včetně hodnot od výrobce. Kompletní tabulky naměřených hodnot přeslechů a hodnoty naměřené výrobcem jsou v příloze A.1.

Hodnoty útlumu u jádra 2–19 se nepodařilo naměřit pravděpodobně z důvodu chybného zapojení konektoru uvnitř optického rozvaděče na portu 19.

Z naměřených hodnot je vidět, že útlum na jádru 1–18 byl naměřen vyšší o cca 40 % u FPM–602, resp. 60 % u PM420 a PM–800. Naopak u jader 6–23 a 7–24 byl naměřen nižší útlum přibližně o 30 % u všech měřičů. U ostatních jader vychází odchylka útlumu v rozmezí $\pm 0,6$ –13 %.

Přeslechy mezi jednotlivými jádry se pohybují v rozsahu přibližně –29,5 dB až –49 dB. Tyto hodnoty jsou dostatečně nízké k tomu, aby se jednotlivá jádra zásadním způsobem neovlivňovala. Celkový průměrný přeslech je –39,37 dB, dle datasheetu 37,40 dB. Průměrné přeslechy při buzení jednotlivých jader jsou v tabulce 7.3. K největším přeslechům dochází při buzení jádra jedna a naopak k nejmenším u jader tři a sedm. Při srovnání naměřených přeslechů s hodnotami v datasheetu je největší odchylka +23,16 % mezi jádrem v portech 6 a 18 nebo –35,90 % mezi jádrem v portech 3 a 21. Vypočteno pro měřicí přístroj EXFO FPM–602, který se dle měření útlumu jader jeví jako nejpresnější.

Použité přístroje:

- Zdroj záření EXFO FLS–600 SN: FLS-600-12D-23BL-EI,
- Měřič výkonu EXFO FPM–600 FPM–602,
- Měřič výkonu Optokon PM420 SN: PM42005079,
- Měřič výkonu Optokon PM–800 SN: PM8004004,
- Optické vlákno InPhoTech SN: 7CF2F201112.

Tab. 7.1: Útlum [dB] při 1310 nm

Jádro \ Měřič	1-18	2-19	3-20	4-21	5-22	6-23	7-24
FPM-602	13,30	—	12,00	8,10	10,90	8,40	5,27

Tab. 7.2: Útlum [dB] při 1550 nm

Jádro Měřič	1-18	2-19	3-20	4-21	5-22	6-23	7-24
FPM-602	8,04	–	6,24	8,57	5,64	5,98	5,37
PM420	9,32	–	6,75	9,61	6,44	6,14	5,79
PM-800	9,21	–	6,52	9,24	6,17	5,74	5,73
Datasheet	5,70	5,20	6,10	9,30	5,70	8,50	8,10

Tab. 7.3: Průměrný útlum při buzení jednoho jádra

Buzené jádro	1-18	2-19	3-20	4-21	5-22	6-23	7-24
Preslech [dB]	–35,23	–39,73	–38,67	–41,99	–38,15	–40,39	–41,41

7.2 OTDR – Optical Time Domain Reflectometry

Metoda zpětného rozptylu je nejpoužívanější metodou pro měření útlumu a rovněž umožňuje lokalizovat poruchy ve vláknech. Měření se provádí za pomoci předřadného vlákna, které by mělo být stejné jako vlákno v měřené optické trase. Jeden konec vlákna se zapojí do OTDR přístroje a druhý konec do vstupního konektoru měřené optické trasy, která je zakončena v optickém rozvaděči.

Předřadné vlákno umožňuje překlenout vstupní nečitelnou oblast označovanou jako „mrtvá zóna“ a umožňuje vyhodnotit vlastnosti vstupního konektoru či nehomogenity na začátku trasy. Díky předřadnému vláknu tedy lze vidět celou měřenou trasu. Doporučuje se, aby délka předřadného vlákna v metrech byla větší než 1/10 šířky impulsu v ns. Nejčastěji se používají délky 500 m a 1000 m. Použitý OTDR přístroj ATOM zahrnuje optický detektor, vysílač i přijímač [5].

7.2.1 Princip metody OTDR

Metoda OTDR využívá Rayleighova rozptylu v optických vláknech a Fresnelova odrazu na konci vlákna. Do vlákna se vysílají světelné impulsy a část rozptýleného signálu se vrátí zpět do OTDR přístroje, kde se vyhodnotí výsledky.

Výkon vyslaného i rozptýleného impulsu klesá se vzdáleností a úroveň zpětně rozptýleného paprsku světla udává úroveň útlumu signálu. Úroveň Rayleighova zpětného rozptylu roste s šířkou a výškou pulsu a závisí na vlnové délce.

Fresnelovy odrazy jsou odrazy způsobené náhlými změnami indexu lomu. Pomocí nich lze určit v jaké vzdálenosti se nachází spoje vláken, konce vláken nebo zlomy. Vzdálenost se určuje pomocí rovnice 7.1 [5].

Rovnice pro měření vzdálenosti v OTDR:

$$l = \frac{c \cdot t}{2n} \text{ [m]}, \quad (7.1)$$

kde l je vzdálenost,

c je rychlost světla ve vakuu,

t je čas mezi vysláním a přijetím pulsu,

n je efektivní index lomu.

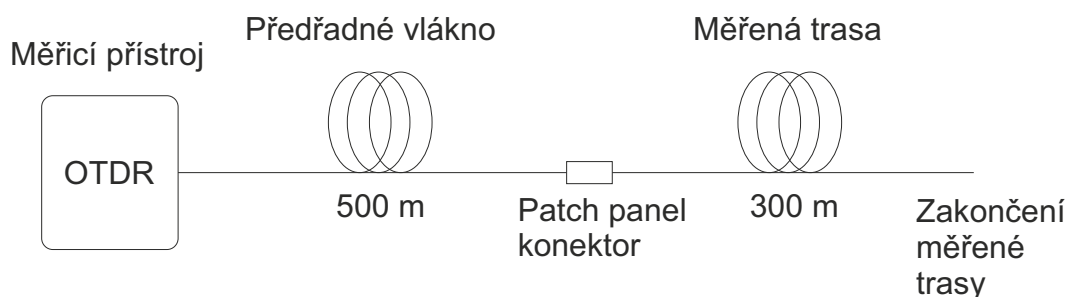
7.2.2 Postup měření

Do OTDR přístroje bylo připojeno předřadné vlákno pomocí konektoru SC/APC, jehož druhý konec byl připojen rovněž pomocí konektoru SC/APC do patch panelu s testovaným optickým vláknem postupně do jednotlivých portů. Bylo použito předřadné vlákno o délce 500 m, podle OTDR měření mělo předřadné vlákno délku 532,4–532,7 m. Schéma zapojení je na obr. 7.3.

Po zapojení trasy se v OTDR přístroji nastaví parametry:

- vlnová délka [1310 nm a 1550 nm]
- šířka impulsu [25 ns],
- délkový rozsah [1000 m],
- doba měření [15 s].

V závorce jsou námi nastavené hodnoty. Samotná měření probíhala zcela automaticky.



Obr. 7.3: OTDR zapojení

7.2.3 Výsledky měření

Měření opět proběhlo na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 7.4 a 7.5. Z těchto hodnot můžeme vidět, že každé jádro má mírně jinou délku, průměrná délka jader je 312,4 m. Zároveň je zde rozdíl u délek stejného jádra, v nejhorším případě je to 4,5 m u jádra 1–18 (1310 nm) a u jádra

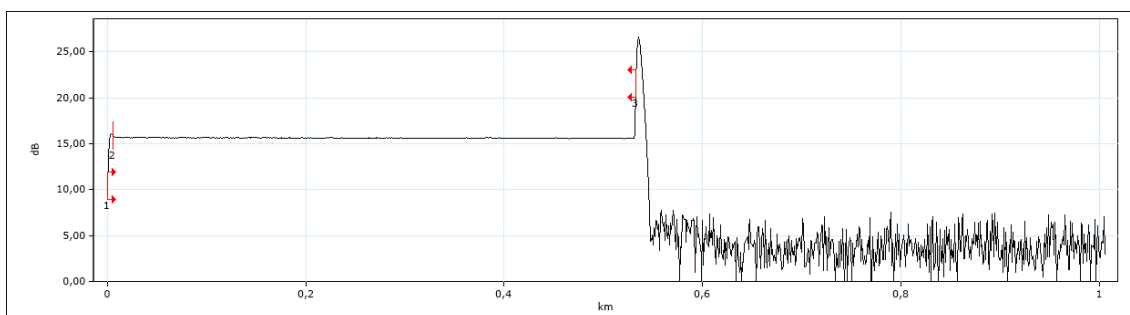
4–18 (1550 nm). Průměrný měrný útlum činí 0,317 dB/km (1310 nm) a 0,153 dB/km (1550 nm).

Chybějící výsledky u portu č. 19 mohou být důsledkem špatného zapojení konektoru v optickém rozvaděči. Na obr. 7.4 můžeme vidět, že na konci předřadného vlákna dochází k odrazu a následuje pouze šum.

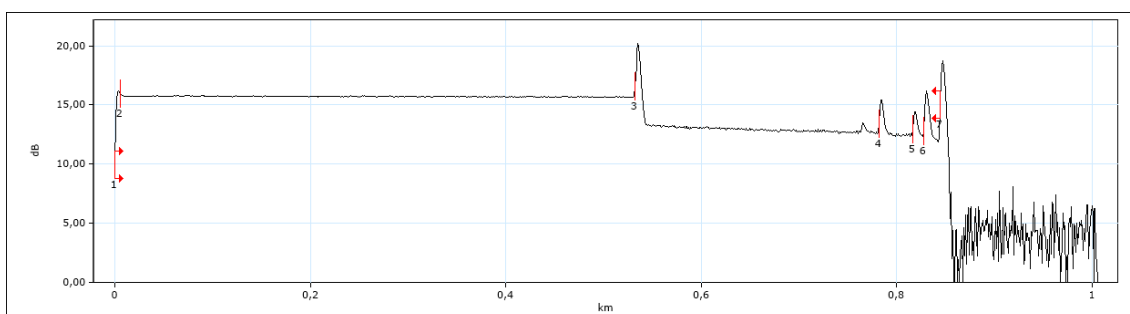
Na obr. 7.5 je graf měření na portu č. 5, kde můžeme vidět nehomogenity způsobující nežádoucí odrazy signálu, které mohou být způsobeny různými deformacemi vlákna.

Použité přístroje:

- OTDR přístroj ATOM S0T-A80 SN: 600100026341,
- Předřadné vlákno SC/APC-SC/APC G652 \varnothing 3.0 500 m NO: 202004024,
- Optické vlákno InPhoTech SN: 7CF2F201112.



Obr. 7.4: OTDR port 19



Obr. 7.5: OTDR port 5

Tab. 7.4: OTDR při 1310 nm

Port	Délka [m]	Ztráta [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Port	Délka [m]	Ztráta [dB]	Měrný útlum [dB/km]
1	316,0	0,100	0,318	18	311,5	0,098	0,315
2	311,5	0,097	0,312	19	-	-	-
3	314,7	0,099	0,316	20	314,7	0,100	0,317
4	311,5	0,100	0,323	21	314,7	0,098	0,312
5	311,8	0,098	0,314	22	311,5	0,098	0,317
6	313,1	0,101	0,324	23	310,5	0,099	0,318
7	311,5	0,097	0,313	24	311,5	0,099	0,319

Tab. 7.5: OTDR při 1550 nm

Port	Délka [m]	Ztráta [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Port	Délka [m]	Ztráta [dB]	Měrný útlum [dB/km]
1	312,6	0,052	0,167	18	311,4	0,045	0,144
2	311,7	0,051	0,163	19	-	-	-
3	314,6	0,052	0,165	20	311,7	0,048	0,153
4	311,0	0,050	0,162	21	315,5	0,046	0,146
5	309,0	0,052	0,164	22	312,3	0,042	0,143
6	313,3	0,049	0,156	23	311,7	0,039	0,126
7	312,3	0,050	0,160	24	311,7	0,044	0,140

Závěr

Cílem bakalářské práce byl rozbor problematiky přenosu optického signálu pomocí vícejádrových (multicore) vláken a testování jejich přenosových vlastností se zaměřením na přeslechy mezi jednotlivými jádry vlákna.

V první části práce byla shrnuta optická vlákna a jejich druhy s podrobnějším popisem vícejádrových optických vláken a jejich nejpoužívanějších konstrukcí s ohledem na rozmístění jader ve vlákně. Dále byly rozebrány přenosové vlastnosti optických vláken zaměřené na přeslechy a disperzi ve vláknech. Byla popsána technika přenosu světla přes optická vlákna a multiplex s prostorovým dělením využívaný ve vícejádrových optických vláknech. Byly shrnuty nejpoužívanější typy konektorů pro spojování optických vláken a typy broušení, bylo popsáno samotné spojování vícejádrových optických vláken pomocí mechanismu tupého spoje, spojování čoček a pomocí Fan-In/Fan-Out zařízení.

Následně byla popsána výroba vícejádrových vláken způsobem skleněné preformy s technikou tyče v trubce a technikou vrtání, dále způsobem vláken fotonického krystalu a stužkových vícejádrových vláken. Bylo rozebráno využití vícejádrových optických vláken v telekomunikacích pro zvýšení přenosové kapacity, v medicíně pro zobrazovací metody, byly uvedeny příklady využití v experimentální fyzice a popsány optické senzorické systémy, jejich využití a možnosti vícejádrových optických senzorů. Byla představena měření 19jádrového a 7jádrového vlákna provedená výzkumnými týmy v Japonsku a USA a popsána nová metoda měření přeslechů s využitím Fresnelova odrazu a FIFO zařízení.

V další části bylo vytvořeno zapojení pro simulační měření v simulační nástroji VPIphotonics, které slouží k analýze optického spektra signálu, zobrazení eye diagramu a měření útlumu u vícejádrových optických vláken. Na základě měření reálného 7jádrového vlákna byly pomocí tohoto zapojení ověřeny jeho teoretické přenosové vlastnosti.

V poslední části byly fyzicky změřeny reálné přenosové vlastnosti 7jádrového vlákna. Byl změřen útlum vlákna, ztráta, kontinuita vlákna a přeslechy mezi jednotlivými jádry vlákna. Měření útlumu a přeslechů mezi jádry bylo provedeno přímou metodou – metodou vloženého útlumu. Druhou metodou byla metoda zpětné reflektometrie OTDR pro měření útlumu, délky a kontinuity vlákna. Měření probíhalo na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulek a porovnány s hodnotami z katalogového listu od výrobce.

Literatura

- [1] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. 2. uprav. vyd. Brno: M. Filka, 2017 [cit. 2020-11-10] ISBN 978-80-86785-14-1.
- [2] ORTIZ, Andrés Macho. *Multi-Core Optical Fibers: Theory, Applications and Opportunities* [online]. Rijeka: IntechOpen [cit. 2020-11-23]. ISBN 978-953-51-3814-3. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/selected-topics-on-optical-fiber-technologies-and-applications/multi-core-optical-fibers-theory-applications-and-opportunities>
- [3] HAYASHI T., T. Sasaki a E. Sasaoka. *Vícejádrová vlákna a jejich přeslechové charakteristiky*. IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, Seattle, WA, 2012. [cit. 2020-11-29], str. 204-205, doi: 10.1109 / PHOSST. 2012.6280774. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6280774>
- [4] TEJA, N.Ravi, M.Aneesh BABU, T.R.S. PRASAD a T. RAVI. *Different Types of Dispersions in an Optical Fiber* [online]. 2. India, Andhra Pradesh, Vadde-swaram: KL University, 2012 [cit. 2020-12-02]. ISSN: 2250-3153. Dostupné z: <http://www.ijserp.org/research-paper-1212.php?rp=P12531>
- [5] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika* [online]. Brno: Code Creator, 2014 [cit. 2020-12-02]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <https://publi.cz/eknihy/?book=185-optoelektrotechnika>
- [6] LIU, M., K. S. CHIANG a Patty SHUM. *Evaluation of intermodal dispersion in a two-core fiber with non-identical cores*. Optics Communication [online]. Elsevier, 1969, 2003, 171-176 [cit. 2020-12-03]. ISSN 0030-4018. doi:10.1016/S0030-4018(03)01279-3. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-16691-w>
- [7] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETEČKA. *Optická vlákna*. Encyklopedie fyziky [online]. 2006 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/557-opticka-vlakna>
- [8] RICHARDSON, D.J., J. FINI a L. NELSON. *Space Division Multiplexing in Optical Fibres*. Nature Photonics [online]. 2013, 7, 354-362 [cit. 2021-5-01]. doi:10.1038/nphoton.2013.94 Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/258806968_Space_Division_Multiplexing_in_Optical_Fibres

- [9] Webster.K. *Konektory SC, LC a ST*. PHGame [online]. 2010, 2021 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: https://phgame.cz/PHGame_serialy/serialy/opticka-vlakna-technologie-prenosu-dat-a-vyhody-optiky/konektory-sc-lc-a-st/
- [10] Pedro. *Optika 2 – druhy konektorů*. Pedro CZ [online]. 2011, 2011 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://pedro-cz.blogspot.com/2011/03/optika-2-druhy-konektoru.html>
- [11] NAGASE R. *How to Connect Multicore and Multimode Fibers* [online]. Optical Fiber Communication Conference: OSA Technical Digest, 2014 [cit. 2020-12-06]. DOI:10.1364/OFC.2014.Tu3D.2. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/263828871_How_to_connect_multicore_and_multimode_fibers
- [12] Y. Tottori, T. Kobayashi and M. Watanabe *Low Loss Optical Connection Module for Seven-Core Multicore Fiber and Seven Single-Mode Fibers*. IEEE Photonics Technology Letters, vol. 24, no. 21 [online], 2012, [cit. 2021-5-03]. Doi:10.1109/LPT.2012.2219305. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6316078>
- [13] JUNG Y., J. R. Hayes, S. U. Alam and D. J. Richardson. *Multicore Fibre Fan-In/Fan-Out Device using Fibre Optic Collimators* [online]. 2017 [cit. 2020-11-25]. European Conference on Optical Communication (ECOC), Gothenburg, 2017, pp. 1-3, ISBN: 978-1-5386-5624-2, DOI: 10.1109/ECOC.2017.8345892. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8345892>
- [14] PASCHOTTA, Rüdiger. *Multi-core fibers*. RP Photonics [online]. Německo: Bad Dürrenheim: RP Photonics Consulting [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/multi_core_fibers.html
- [15] ISHIDA I., T. Akamatsu, Z. Wang, Y. Sasaki, K. Takenaga and S. Matsuo. *Possibility of stack and draw process as fabrication technology for multi-core fiber* [online]. USA, CA, Anaheim: Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/N-FOEC): IEEE [cit. 2020-11-28], str. 1-3, doi: 10.1364/OFC.2013.OTu2G.1. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6533007>
- [16] HECHT, Jeff. *Holes in photonic crystal fibers open new possibilities*. LaserFocusWorld [online]. USA: California: Endeavor business media, 2020 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/optics/article/16556669/holes-in-photonic-crystal-fibers-open-new-possibilities>

- [17] FATEMEH, Amirkhan, aj. *Multicore ribbon fiber: a new fabrication method*. IEEE Photonics Technology Letters [online]. IEEE, 2014, 26(19), 1972-1974 [cit. 2020-12-07]. ISSN 1941-0174. DOI:10.1109/LPT.2014.2343637. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/265416408_Multicore_Flat_Fiber_A_New_Fabrication_Technique
- [18] *FBG multicore fibers are used as medical tools*. Fiberfin [online]. USA, Massachusetts, Cambridge: Optromix, 2020 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://fibergratings.com/fbg-multicore-fibers-are-used-as-medical-tools/>
- [19] VILLATORO, J., O. ARRIZABALAGA a J. ZUBIA. *Multicore fibre sensors*. Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim [online]. 2017 [cit. 2021-4-16]. doi:10.1364/OFC.2017.Th3H.1. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/314666486_Multicore_Fiber_Sensors
- [20] IMAMURA K., T. Gonda and R. Sugizaki. *19-Core fiber with new core arrangement to realize low crosstalk* [online]. 2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology, Melbourne, VIC, 2014, pp. 312-313. [cit. 2020-11-30] ISBN: 978-1-922107-21-3. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6888090>
- [21] RYF R. et al. *Coupled-Core Transmission Over 7-Core Fiber* [online]. 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1-3. [cit. 2020-11-30] ISBN: 978-1-943580-53-8. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8696396>
- [22] YE F., H. Ono, Y. Abe, M. Yamada and T. Morioka. *Novel Crosstalk Measurement Method for Multi-Core Fiber Fan-In/Fan-Out Devices* in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 28, no. 20, pp. 2269-2272, 15 Oct.15, 2016, [cit. 2020-12-03] DOI: 10.1109/LPT.2016.2591941. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7514933>
- [23] INPHOTECH SP. Z O.O. Multicore fiber with fan in/out datasheet: SN: 7CF2F20111. Polsko.

A Kompletní tabulky naměřených hodnot

A.1 Přímá metoda

Tab. A.1: Útlum [dB] při 1310 nm, FPM-602

Channel	18	19	20	21	22	23	24
1	13,30	–	36,60	32,30	32,90	38,52	38,44
2	33,75	–	31,55	39,75	46,60	47,30	37,60
3	34,80	–	12,00	27,95	42,20	46,28	46,50
4	41,22	–	32,20	8,10	30,10	52,21	53,63
5	34,46	–	44,75	39,52	10,87	37,34	47,11
6	30,63	–	44,86	40,42	36,71	8,40	39,33
7	33,70	–	40,68	47,16	45,97	32,45	5,27

Tab. A.2: Útlum [dB] při 1550 nm, FPM-602

Channel	18	19	20	21	22	23	24
1	8,04	–	31,52	37,76	38,17	33,13	35,55
2	36,35	–	32,21	38,97	44,8	48,01	38,08
3	29,55	–	6,24	28,33	40,85	47,88	46,76
4	38,50	–	37,30	8,57	37,25	49,10	47,82
5	33,00	–	44,10	35,19	5,64	32,65	45,80
6	42,17	–	39,02	44,90	39,35	5,98	36,45
7	32,20	–	45,65	44,10	48,89	36,21	5,37

Tab. A.3: Útlum [dB] při 1550 nm, Datasheet

Channel	18	19	20	21	22	23	24
1	5,7	38,7	31,1	40,5	31,7	37,4	31,9
2	36,9	5,2	31,0	39,8	39,3	40,2	36,3
3	30,1	34,7	6,1	38,5	38,5	39,1	40,5
4	36,3	38,9	40,2	9,3	34,1	38,8	38,5
5	35,0	39,3	38,0	39,4	5,7	38,1	38,8
6	32,4	39,8	39,7	39,4	36,0	8,5	34,7
7	36,2	39,0	39,9	39,0	38,7	36,4	8,1

Tab. A.4: Útlum [dB] při 1550 nm, PM-420

Channel	18	19	20	21	22	23	24
1	9,32	–	32,98	39,12	39,44	34,44	36,51
2	36,59	–	33,15	39,57	45,22	49,08	37,17
3	29,27	–	6,75	28,03	41,87	48,81	46,98
4	38,17	–	37,98	9,61	37,42	50,51	48,62
5	31,59	–	43,86	35,97	6,44	34,67	45,34
6	42,06	–	39,98	45,55	40,08	6,14	36,66
7	33,24	–	46,39	44,88	49,29	37,37	5,79

Tab. A.5: Útlum [dB] při 1550 nm, PM-800

Channel	18	19	20	21	22	23	24
1	9,21	–	33,36	39,17	39,25	34,49	36,14
2	35,14	–	33,71	40,02	46,81	48,19	35,88
3	28,29	–	6,52	28,76	41,75	48,96	46,42
4	38,52	–	37,38	9,24	36,47	49,59	48,87
5	33,29	–	44,59	35,81	6,17	33,14	45,23
6	42,18	–	39,65	45,74	39,57	5,74	37,00
7	33,48	–	46,61	44,78	49,19	37,18	5,73

Tab. A.6: Útlum [dB] při 1550 nm, Datasheet

Channel	18	19	20	21	22	23	24
1	5,7	38,7	31,1	40,5	31,7	37,4	31,9
2	36,9	5,2	31,0	39,8	39,3	40,2	36,3
3	30,1	34,7	6,1	38,5	38,5	39,1	40,5
4	36,3	38,9	40,2	9,3	34,1	38,8	38,5
5	35,0	39,3	38,0	39,4	5,7	38,1	38,8
6	32,4	39,8	39,7	39,4	36,0	8,5	34,7
7	36,2	39,0	39,9	39,0	38,7	36,4	8,1